



Поверхностное натяжение

Л. Г. Асламазов

Удивительно разнообразны проявления поверхностного натяжения жидкостей в природе и технике. Оно собирает воду в капли, благодаря ему мы можем выдуть мыльный пузырь и писать ручкой. Поверхностное натяжение играет важную роль в физиологии нашего организма. Его используют в космической технике. Почему же поверхность жидкости ведет себя подобно растянутой упругой пленке? Попробуем в этом разобраться.

Поверхностная энергия

Молекулы, расположенные в тонком слое жидкости вблизи поверхности, находятся в особых условиях. Они имеют одинаковых с ними соседей только с одной стороны поверхности, в отличие от молекул внутри жидкости, окруженных со всех сторон такими же молекулами. Поэтому результирующая сила, действующая на молекулу в поверхностном слое, отлична от нуля. Например, на свободной поверхности жидкости (рис. 1) эта сила направлена внутрь жидкос-



Рис. 1.

ти, так как молекула на поверхности испытывает значительно большее притяжение со стороны молекул жидкости, чем со стороны молекул воздуха.

При перемещении молекулы с поверхности в объем жидкости совершается положительная работа. Это означает, что молекулы в поверхностном слое обладают избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами внутри жидкости. Разумеется, молекулы жидкости находятся в непрерывном тепловом движении — одни молекулы уходят с поверхности, другие, наоборот, попадают на нее. Но можно говорить о средней добавочной энергии поверхностного слоя жидкости — о поверхностной энергии, пропорциональной площади поверхности жидкости.

Известно, что из всех возможных состояний системы устойчивым является то, в котором энергия системы минимальна. В частности, и поверхность жидкости стремится принять такую форму, при которой ее поверхностная энергия будет минимальна. Как говорят, жидкость обладает поверхностным натяжением, стремящимся сократить, уменьшить ее поверхность. Коэффициентом поверхностного натяжения называют поверхностную энергию, приходящуюся на единицу площади, или силу, приходящуюся на единицу длины границы поверхности. Легко доказать (сделайте это сами), что оба определения коэффициента поверхностного натяжения эквивалентны.

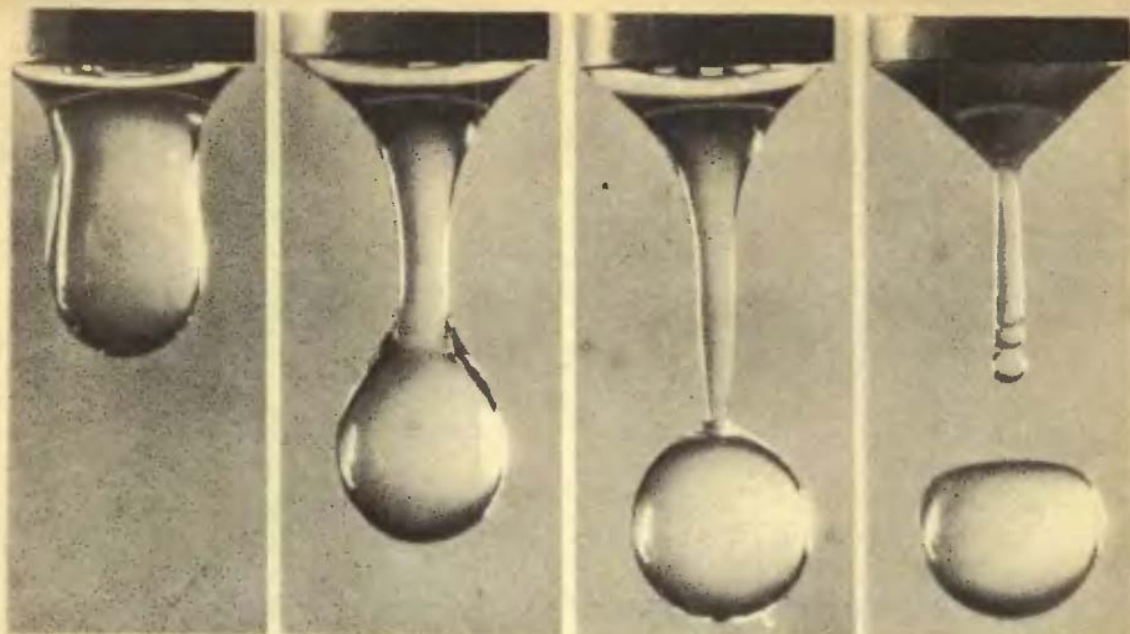


Рис. 2.

Стремлению поверхностного натяжения уменьшить поверхность жидкости обычно противодействуют другие силы. Например, капля жидкости почти никогда не является шаром, хотя шар имеет наименьшую из всех фигур поверхность при заданном объеме. Когда капля покоится на неподвижной горизонтальной поверхности, она оказывается сплюсненной. Сложную форму имеет и падающая в воздухе капля. И только капля, находящаяся в невесомости, принимает совершенную сферическую форму.

Устранить действие силы тяжести при изучении поверхностного натяжения жидкостей впервые догадался в середине прошлого века бельгийский ученый Ж. Плато. Разумеется, в то время и не мечтали о настоящей невесомости, и Плато просто предложил уравновесить силу тяжести архимедовой выталкивающей силой. Он поместил исследуемую жидкость (масло) в раствор, обладающий такой же плотностью, и, как пишет его биограф, «с удивлением увидел, что масло приняло сферическую форму; он тотчас же применил свое правило «вовремя удивляться», и это явление послужило затем для него предметом долгих размышлений».

Свой метод Плато применил для исследования различных явлений. Например, он изучил процесс образования и отрыва капли жидкости на конце трубки.

Обычно, как бы медленно мы ни растили каплю, она отрывается от трубки так быстро, что глаз не может уследить за деталями этого процесса. Плато помещал конец трубки в жидкость, плотность которой была только немного меньше плотности капли. Действие силы тяжести при этом ослаблено, можно вырастить очень большую каплю и увидеть, как она отрывается от трубки.

На рисунке 2 приведены фотографии, на которых показаны различные стадии красивого процесса образования и отрыва капли (фотографии получены современным методом — с помощью скоростной киносъемки). Попробуем объяснить это явление. Пока капля растет медленно, можно считать, что в каждый момент времени она находится в равновесии. Тогда при заданном объеме капли ее форма определяется из условия, что сумма поверхностной энергии и потенциальной энергии капли, обусловленной силой тяжести, минимальна. Поверхностное натяжение вызывает сокращение по-

верхности капли, она стремится придать капле сферическую форму. Сила тяжести, наоборот, стремится расположить центр тяжести капли как можно ниже. В результате капля оказывается вытянутой.

Чем больше капля, тем большую роль играет потенциальная энергия силы тяжести. Основная масса по мере роста капли собирается внизу, и у капли образуется шейка (вторая фотография на рисунке 2). Сила поверхностного натяжения направлена вертикально по касательной к шейке. Она уравнивает силу тяжести, действующую на каплю. Теперь достаточно капле совсем немного увеличиться, и силы поверхностного натяжения уже не смогут уравновесить силу тяжести. Шейка капли быстро сужается (третья фотография на рисунке 2), и в результате капля отрывается (четвертая фотография). При этом от шейки капли отделяется маленькая капля, которая падает вслед за большой. Вторичная капелька образуется всегда (ее называют шариком Плато), но так как процесс отрыва капли — очень быстрый, обычно мы этой вторичной капельки не замечаем.

Отрыв капли используют для измерения величины поверхностного натяжения жидкостей. Когда капля еще висит на шейке, сила тяжести уравновешена силами поверхностного натяжения, действующими по периметру поперечного сечения шейки:

$$mg = 2\pi r\sigma,$$

где r — радиус самого узкого места шейки, в котором силы поверхностного натяжения направлены вертикально, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Масса висящей на шейке капли m , как уже отмечалось, практически равна массе отрывающейся капли. Поэтому, измеряя радиус шейки r и определяя массу оторвавшейся капли m взвешиванием, можно найти величину поверхностного натяжения жидкости:

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi r}.$$

Для большей точности обычно набирают в сосуд много капель и, разделив их общую массу на число капель, находят среднюю массу капли m . Для более точного определения радиуса шейки r , при котором капля еще не отрывается, ее освещают расходящимся пучком света и по размерам тени на экране и коэффициенту увеличения определяют размер шейки.

Мыльные пленки

Прекрасным объектом для изучения поверхностного натяжения являются мыльные пленки. Сила тяжести здесь почти не играет роли, так как пленки чрезвычайно тонки и их масса совершенно ничтожна. Основную роль здесь играет поверхностная энергия, и поэтому у мыльных пленок форма поверхности всегда такова, что ее площадь минимальна.

Наверное, всем доводилось видеть мыльные пузыри. Они могут свободно парить в воздухе и совершенно сферичны.

Давление внутри пузыря больше атмосферного давления, причем чем меньше радиус пузыря R , тем больше избыточное давление внутри пузыря. Это избыточное давление $\Delta p_{сф}$ (для сферического пузыря) определяется по известной формуле Лапласа:

$$\Delta p_{сф} = \frac{2\sigma'}{R},$$

где $\sigma' = 2\sigma$ — удвоенный коэффициент поверхностного натяжения жидкости (у пленки — две поверхности).

Величина, обратная радиусу сферы, называется ее кривизной: $\rho = \frac{1}{R}$.

Написанная выше формула означает, что избыточное давление пропорционально кривизне сферы.

Шар — не единственная форма, которую можно придать мыльному пузырю. Если поместить пузырь между двумя кольцами, то его можно растягивать, пока он не примет форму цилиндра со сферическими «шапками» (рис. 3).



Рис. 3.

Чему равно избыточное давление внутри такого пузыря? У цилиндрической поверхности кривизна по разным направлениям различна. Вдоль образующей цилиндра кривизна равна нулю (образующая — прямая линия)*), а в сечении, перпендикулярном оси цилиндра, его кривизна равна $1/R$, где R — радиус цилиндра. Какое же значение ρ мы должны подставить в предыдущую формулу? Оказывается, разность давлений по разные стороны любой поверхности определяется ее средней кривизной. Что это за величина?

*) Что такое кривизна плоской кривой? Кривизна окружности определяется так же, как и кривизна сферы: $\rho_{\text{окр}} = 1/R$, где R — радиус окружности. Если же кривая не является окружностью, то тем не менее ее отдельные маленькие участки можно приближенно считать дугами окружностей определенных радиусов. Величины, обратные этим радиусам, и называются кривизнами плоской кривой в различных ее точках.

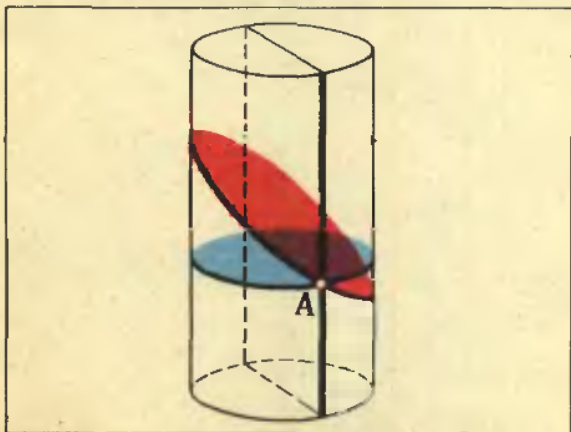


Рис. 4.

Проведем через нормаль к поверхности в точке A плоскости. Сечения цилиндрической поверхности этими плоскостями (они называются нормальными сечениями) могут быть окружностью, эллипсом или прямой (рис. 4). Легко видеть, что кривизны этих сечений в точке A различны: максимальной кривизной обладает поперечное сечение — окружность, а минимальной, равной нулю, — прямая (продольное сечение). Средняя кривизна $\rho_{\text{сред}}$ определяется как полусумма максимальной и минимальной кривизн нормальных сечений:

$$\rho_{\text{сред}} = \frac{\rho_{\text{max}} + \rho_{\text{min}}}{2}.$$

Это определение годится не только для цилиндра, и так можно определить среднюю кривизну в данной точке любой поверхности.

У цилиндрической поверхности в любой точке максимальная кривизна $\rho_{\text{max}} = \frac{1}{R}$, где R — радиус поперечного сечения цилиндра, а $\rho_{\text{min}} = 0$. Поэтому средняя кривизна $\rho_{\text{цил}} = \frac{1}{2R}$, а избыточное давление внутри цилиндрического пузыря $\Delta p_{\text{цил}} = \frac{\sigma'}{R}$.

Как видно, у цилиндрического пузыря избыточное давление — такое же, как у сферического пузыря вдвое большего радиуса. Поэтому радиус сферических «шапок» у цилиндрического пузыря будет вдвое больше, чем радиус цилиндра, и они являются сферическими сегментами, а не полусферами.

А что если вообще уничтожить избыточное давление в таком пузыре, заставив, например, лопнуть «шапки»? Казалось бы, так как внутри пузыря нет никакого избыточного давления, поверхность его не должна иметь кривизны. А тем не менее стенки пузыря изгибаются внутрь и пузырь принимает форму катеноида (от ла-

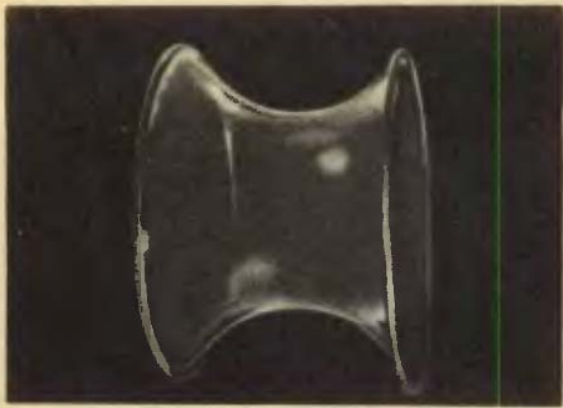


Рис. 5.

тинского слова «катена» — цепь; эту поверхность можно получить вращением вокруг оси кривой, имеющей форму подвешенной горизонтально за концы цепи — цепной линии). В чем же тут дело?

Присмотритесь к этой поверхности (рис. 5). Обратите внимание на ее узкое место — перехват. Легко видеть, что этот перехват является одновременно и выпуклым, и вогнутым. Его поперечное сечение — окружность, а продольное — цепная линия. Кривизна направления внутрь должна увеличивать давление внутри пузыря, кривизна же направления наружу должна уменьшать его. (Давление под вогнутой поверхностью больше, чем над ней). В случае катеноида эти кривизны одинаковы по величине, и так как направлены они в противоположные стороны, средняя кривизна равна нулю. Следовательно, внутри такого пузыря нет избыточного давления.

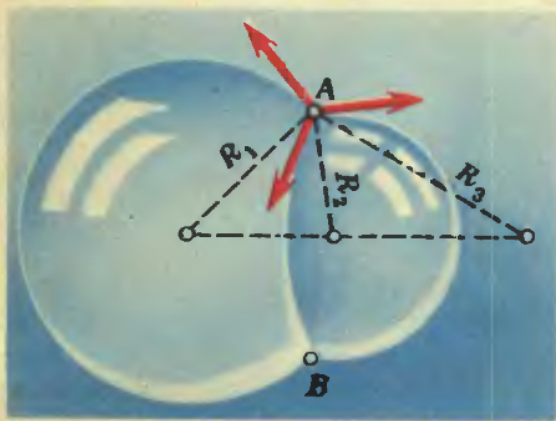


Рис. 6.

Существует множество других поверхностей, которые кажутся кривыми во всех направлениях, но тем не менее их средняя кривизна равна нулю, и эти поверхности не производят никакого давления. Чтобы получить их, нужно лишь взять любую гнутую проволочную рамку и погрузить ее в мыльную воду. Вынимая рамку, можно увидеть разнообразные поверхности с нулевой средней кривизной, форма которых зависит от формы рамки. Однако катеноид — единственная, кроме плоскости, поверхность вращения с нулевой средней кривизной.

Одной из задач специальной математической науки дифференциальной геометрии является отыскание таких поверхностей с нулевой средней кривизной, натянутых на замкнутые пространственные кривые. Существует точная математическая теорема, утверждающая, что площадь таких поверхностей всегда минимальна, и она нам покажется теперь очевидной.

Мыльные пузыри могут соединяться друг с другом, образуя пену. Несмотря на кажущуюся хаотичность в расположении мыльных пленок в пене, всегда выполняется такой закон: пленки пересекают друг друга лишь под равными углами (см. фото на обложке).

Рассмотрим, например, два пузыря, находящихся в контакте друг с другом и имеющих общую перегородку. Избыточные (по сравнению с атмосферным) давления внутри пузырей различны и определяются формулой Лапласа:

$$\Delta p_1 = \frac{2\sigma'}{R_1}, \quad \Delta p_2 = \frac{2\sigma'}{R_2}.$$

Поэтому перегородка должна быть такой, чтобы создавать дополнительное давление, равное разности давлений внутри пузырей. Следовательно, она должна обладать определенной кривизной. Радиус R_3 кривизны перегородки определяется из соотношения

$$\frac{2\sigma'}{R_3} = \frac{2\sigma'}{R_2} - \frac{2\sigma'}{R_1},$$

то есть

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

На рисунке 6 изображен разрез пузырей в плоскости, проходящей через их центры. Точки *A* и *B* представляют собой точки пересечения с плоскостью чертежа окружности, по которой соприкасаются два пузыря. В любой точке этой окружности встречаются три пленки. Так как их поверхностное натяжение одинаково, то они могут «уравновесить» друг друга лишь в том случае, когда углы, под которыми они пересекаются, равны между собой и, следовательно, каждый равен 120° .

Капиллярность

Поверхностной энергией обладает не только свободная поверхность жидкости, но и граница двух жидкостей, поверхность раздела жидкости и твердого тела, свободная поверхность твердого тела. Во всех этих случаях можно говорить о поверхностной энергии как о разности между энергией всех молекул вблизи поверхности раздела и той энергией, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри соответствующих граничащих сред.

Величина поверхностной энергии определяется свойствами обеих сред. Например, если на границе воды с воздухом коэффициент поверхностного натяжения равен 73 дн/см (при 20°C и нормальном атмосферном давлении), то у границы воды с эфиром от всего около 12 дн/см , а на границе воды с ртутью 427 дн/см . Поверхностное натяжение обычно уменьшается с увеличением температуры. В частности, на границе жидкости с ее насыщенным паром в критической точке оно вообще обращается в нуль, так как при этом исчезает различие между жидкостью и паром.

Рассмотрим жидкость, находящуюся в сосуде. На краю поверхности жидкости мы имеем дело с соприкосновением трех сред — твердой стенки,

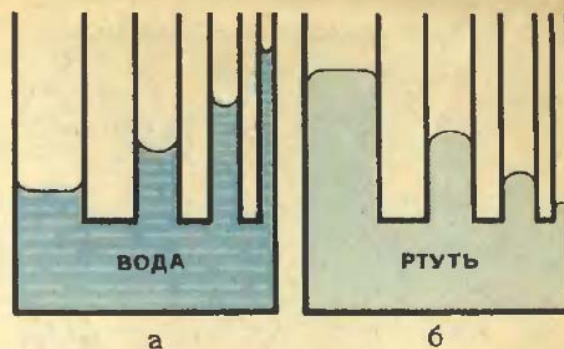


Рис. 7.

жидкости и газа. Поверхностные явления в этом случае называют явлениями капиллярности. Полная поверхностная энергия, как обычно, стремится быть минимальной. Поэтому, если поверхностная энергия на границе стенки и жидкости меньше, чем на границе стенки с газом (на единицу площади), то жидкость стремится увеличить площадь контакта со стенкой, и ее край поднимается. (Такой случай имеет место на границе воды и чистого стекла.)

Однако поднятие жидкости сопровождается увеличением ее потенциальной энергии. Если сосуд широкий, то форма поверхности жидкости в основном определяется силой тяжести. Жидкость приподнимается только у краев, а большая часть ее поверхности будет плоской и горизонтальной. Если же сосуд узкий, то искривляется вся поверхность жидкости — образуется мениск, и жидкость может подняться на некоторую высоту (рис. 7а). Мениск имеет сферическую форму, так как при этом минимальна поверхностная энергия на границе жидкость — газ (название «мениск» происходит от латинского слова «*meniscus*» — маленькая луна).

На границе стекла и ртути поверхностная энергия больше, чем на свободной поверхности стекла. Поэтому ртуть в стеклянном сосуде стремится уменьшить площадь контакта со стеклом и у краев опускается (рис. 7б). Говорят, что ртуть не смачивает стекло, а вода, наоборот, его смачивает.

Величина поверхностного натяжения на границе жидкости и твердого тела определяется силой взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердого тела. Если бы молекулы жидкости и твердого тела не взаимодействовали между собой, то поверхностная энергия границы твердого тела с жидкостью была бы равна сумме энергий на границах твердого тела и жидкости с газом (на единицу площади поверхности): $\sigma_{т-ж} = \sigma_{т-г} + \sigma_{ж-г}$ (работа по перемещению молекулы из объема на поверхность — одна и та же, граничит ли среда с газом или с другой практически не взаимодействующей с ней средой). В этом случае $\sigma_{т-ж} > \sigma_{т-г}$, и жидкость не смачивала бы твердое тело.

Реально молекулы жидкости и твердого тела всегда притягиваются друг к другу. Поэтому поверхностная энергия границы твердого тела с жидкостью меньше суммы энергий границ с газом: $\sigma_{т-ж} = \sigma_{т-г} + \sigma_{ж-г} - \Delta\sigma$ (вследствие притяжения к другой среде работа по переносу молекулы из объема на поверхность, очевидно, уменьшается). Если притяжение между молекулами граничащих сред достаточно велико, то $\Delta\sigma > \sigma_{ж-г}$. В этом случае $\sigma_{т-ж} < \sigma_{т-г}$, и жидкость уже смачивает твердую поверхность.

При дальнейшем усилении взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела $\Delta\sigma$ станет равным $2\sigma_{ж-г}$, и соответственно, $\sigma_{т-ж} = \sigma_{т-г} - \sigma_{ж-г}$. В этом случае тонкая пленка жидкости может образоваться на всей поверхности твердого тела, так как выигрыш в поверхностной энергии вследствие увеличения границы жидкости с газом компенсируется увеличением площади ее контакта с твердым телом: $\sigma_{ж-г} = \sigma_{т-г} - \sigma_{т-ж}$ (увеличение потенциальной энергии при этом ничтожно мало, если пленка достаточно тонкая). Край жидкости непрерывным образом переходит в образующуюся на стенке пленку, и угол между поверхностью жидкости и стенкой равен нулю. Как

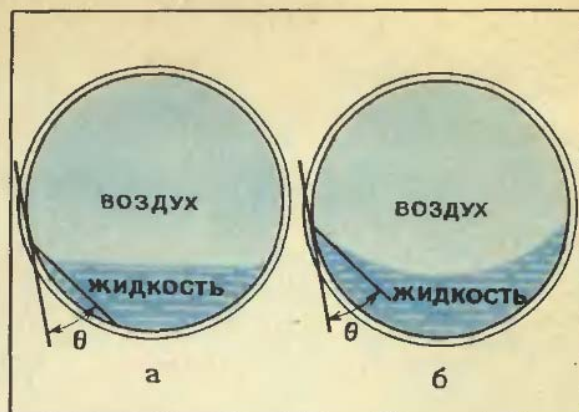


Рис. 8.

говорят, жидкость полностью смачивает твердое тело.

Особенно ярко капиллярные явления проявляются в невесомости. Первым в мире исследовал жидкость в состоянии космической невесомости космонавт П. С. Попович на корабле «Восток-3». В его кабине находилась стеклянная сферическая колба с водой. На Земле вода наполовину заполняла колбу. В состоянии невесомости — при движении корабля по орбите вокруг Земли — вода «расползлась» по всей внутренней поверхности стенок колбы и замкнула внутри себя воздух в виде шара. Поверхности раздела вода — воздух и вода — стекло при этом увеличились. Однако исчезла граница между воздухом и стеклом, и в данном случае это оказалось энергетически выгоднее.

Наших знаний оказывается достаточно для того, чтобы объяснить это явление. Если жидкость смачивает поверхность колбы, то в земных условиях, как мы уже разобрались, она слегка поднимается у краев, образуя некоторый краевой угол θ между поверхностью жидкости и стенками колбы (рис. 8, а).

В невесомости поверхность жидкости уже не должна быть плоской. Поэтому вода, смачивая стенки колбы, будет подниматься, увеличивая поверхность соприкосновения со стеклом. Однако замечательно, что в равновесии краевой угол θ между поверхностью жидкости и стенками колбы должен остаться тем же, каким он был на Земле.

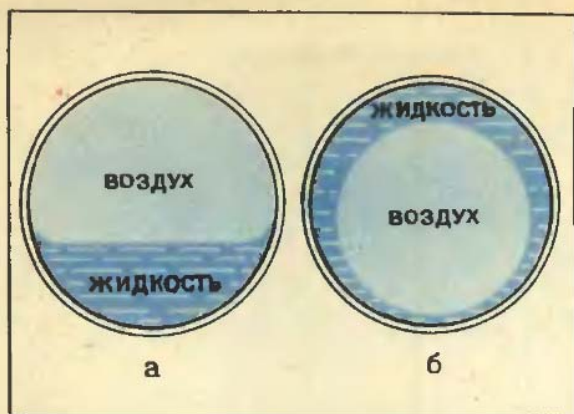


Рис. 9.

В самом деле, на единицу длины окружности, по которой происходит соприкосновение воды со стенками колбы, действуют только три силы поверхностного натяжения: σ_{2-3} — поверхностное натяжение на границе воздуха и воды, σ_{1-2} — натяжение на границе воды и стекла и σ_{3-1} — натяжение на границе стекла с воздухом. В равновесии поверхность жидкости образует такой краевой угол со стенкой, чтобы равнодействующая этих трех сил не имела составляющей вдоль стенки: $\sigma_{1-3} = \sigma_{1-2} + \sigma_{2-3} \cos \theta$ (перпендикулярная составляющая уравнивается силой реакции стенки). Поэтому

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1-3} - \sigma_{1-2}}{\sigma_{2-3}}$$

Мы видим, что краевой угол зависит только от природы трех соприкасающихся сред, а именно от поверхностного натяжения на их границах. Он не зависит от величины силы тяжести и от формы сосуда.

Поверхность жидкости, граничащая с воздухом, в невесомости должна быть минимальной, а потому сферической. Тогда становится ясной конечная картина расположения жидкости в колбе в невесомости. Сферическая поверхность жидкости охватывает воздух у стенок колбы так, чтобы сохранился краевой угол θ (рис. 8б). Разумеется, понятия верха и низа в невесомости отсутствуют, и эту картину можно повернуть как угодно.

Почему же вода в стеклянной колбе окружала пузырь со всех сторон,

отрывая его от стенок колбы? Это легко понять — ведь чистая вода полностью смачивает чистое стекло (рис. 9, а). Краевой угол равен нулю, и жидкость заключает воздух в сферический пузырь, который должен касаться своей поверхностью стенок колбы. Но тогда он может от них оторваться и расположиться внутри жидкости (рис. 9, б).

Конечно, такое исследование поведения жидкости в невесомости имеет только качественный характер, и настоящие расчеты — сложная физическая и математическая задача. Однако такое качественное исследование помогло нам правильно представить себе поведение «невесомой» жидкости.

Как моет мыло?

При растворении даже незначительного количества мыла или стирального порошка в воде ее моющее действие значительно усиливается. Это свойство объясняется тем, что мыло, скап-

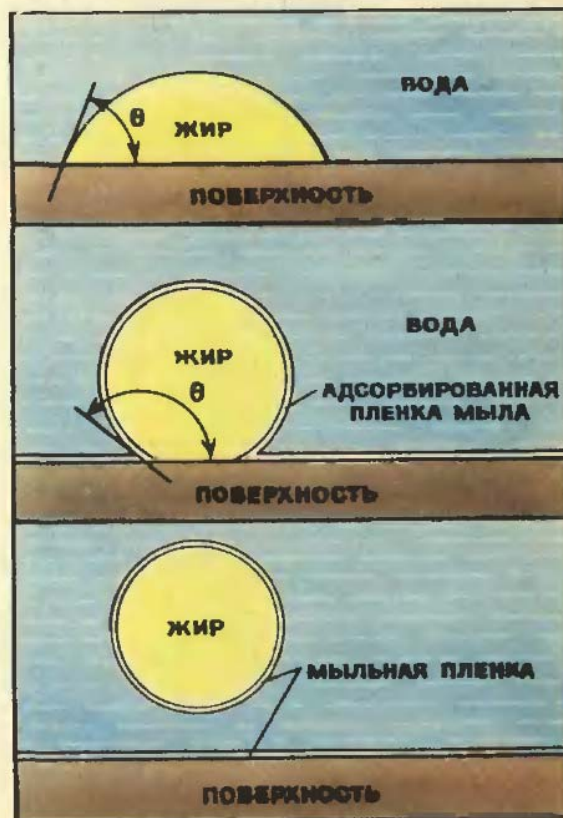


Рис. 10.

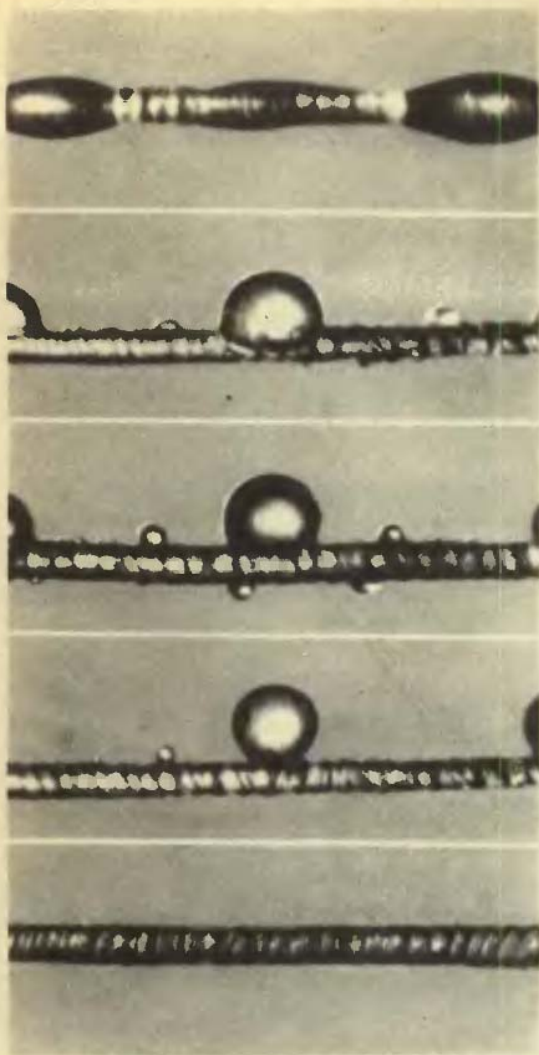


Рис. 11.

ливаясь (адсорбируясь) на границе воды с отмываемой поверхностью или тканью, значительно уменьшает поверхностное натяжение. В результате ослабляется прилипание частичек жира и грязи к поверхности.

Пусть, например, на поверхности имеется капелька жира, который смачивает ее (рис. 10). Краевой угол θ определяется, как нам уже известно, коэффициентами поверхностного натяжения на границах раздела. Если в воду добавить мыло, то молекулы мыла, адсорбируясь на границах вода — жир и вода — поверхность, значительно уменьшают коэффициенты $\sigma_{в-ж}$ и $\sigma_{в-п}$. Натяжение $\sigma_{в-п}$ оказывается меньшим, чем $\sigma_{ж-п}$, и соответственно, $\cos \theta < 0$, то есть $\theta > 90^\circ$. Жидкость перестает смачивать по-

верхность. Уменьшение коэффициента $\sigma_{в-ж}$ при этом, как легко видеть, также увеличивает краевой угол.

При краевом угле $\theta = 180^\circ$ жир абсолютно не смачивает поверхность, и капелька жира сама отрывается от нее. Если же уменьшение поверхностного натяжения не столь велико, то во всяком случае после увеличения краевого угла θ капли легко отрываются от поверхности при механических воздействиях во время мойки или стирки.

На рисунке 11 показана серия увеличенных фотографий шерстяной нити. На первой фотографии — нить, испачканная жидким парафином. Три следующие фотографии показывают очищающее действие раствора стирального порошка. Ясно видно, как увеличивается краевой угол поверхности парафина с нитью. Парафиновый жир сворачивается в глобулы и уносится водой. Последняя фотография показывает уже совсем чистую нить.

Адсорбированные молекулы мыла окружают капельки жира и отмываемую поверхность плотно заполненным одинарным (мономолекулярным) слоем, который обладает высокой механической прочностью. Молекулы мыла сильно связаны друг с другом, и разорвать пленку очень трудно. Поэтому при стирке пленки из адсорбированных молекул не разрушаются и препятствуют обратному прилипанию уже оторвавшихся капелек жира к поверхности и слиянию капелек друг с другом.

Оторвавшиеся при стирке твердые частички грязи также оказываются окруженными молекулами мыла, которые препятствуют их обратному прилипанию к поверхности. Проигрыв в поверхностной энергии при отрыве частицы с поверхности в мыльный раствор $E = S(\sigma_{ч-в} + \sigma_{п-в} - \sigma_{ч-п})$ (S — площадь контакта с поверхностью), очевидно, меньше, чем если бы частичка оказалась в чистой воде; таким образом, адсорбция ослабляет прилипание твердых частичек к поверхности. Взвешенные

в воде частички грязи и капельки жира удаляются вместе с ней.

Интересно, что образование устойчивой пены — это только побочный эффект уменьшения поверхностного натяжения при растворении моющих веществ. Пена образуется из пузырьков воздуха, которые попадают внутрь воды (при перемешивании, со струей воды). Затем они всплывают к ее поверхности и оказываются окруженными пленкой жидкости. Если поверхностное натяжение невелико, то мало и избыточное давление внутри пузырька, и он долго не лопается. Немалую роль тут, конечно, играет и высокая прочность мыльных пленок.

Механизм моющего действия, который был здесь разобран, представляет интерес и в связи с другими важными техническими задачами — покрытием поверхностей лаками и красками, склеиванием, окраской тканей суспензиями, изготовлением непромкаемых тканей.

Например, для того чтобы сделать ткань водоотталкивающей, ее обрабатывают специальным веществом, которое образует вокруг каждого волокна тонкую пленку. Эта пленка значительно увеличивает поверхностное натяжение на границе вода — ткань, но мало меняет натяжение на границе ткань — воздух. Если обратиться к формуле для краевого угла θ , то легко увидеть, что угол θ при этом возрастает. В результате вода не смачивает ткань, а собирается на ней в капли, которые скатываются с материала.

Адсорбционные пленки используют для уменьшения испарения воды с поверхности водоемов, что является важной проблемой в засушливых районах. Защитную пленку легко создать по всей поверхности водоема, так как адсорбция всегда уменьшает поверхностное натяжение (в противном случае адсорбция вообще не произошла бы, так как при этом увеличилась бы поверхностная энергия). На границу пленки действует сила поверхностного натяжения чистой воды, стремящаяся растянуть пленку, и

сила натяжения самой пленки, направленная в противоположную сторону. Поверхностное натяжение чистой воды больше, и в результате пленка покрывает всю чистую поверхность.

Для создания защитных пленок используют специальное вещество — гексадеканол. В обычных условиях это — твердое вещество, оно плавает на поверхности воды. Если при этом вся поверхность воды покрыта адсорбированным мономолекулярным слоем, то вещество не расходуется. Однако, стоит пленке где-либо испортиться, как поверхностное натяжение в этом месте увеличится, стянет пленку с соседних участков и т. д. В результате нарушается пленка и возле плавающего кусочка вещества, которое и восстанавливает пленку.

Было найдено, что для создания защитной пленки на площади в 1 га необходимо около 20 г гексадеканола, а потери в среднем равны 2—3 мономолекулярным слоям в день. Поэтому расход вещества для поддержания пленки составляет всего около 60 г в день на 1 га, и такой способ оказывается экономически выгодным. Например, в Австралии с его помощью ежегодно сохраняется около 10 миллионов литров воды с каждого гектара водной поверхности.

У п р а ж н е н и я

1. Известно, что некоторые насекомые не только удерживаются на поверхности воды за счет поверхностного натяжения, но и передвигаются по ней, выделяя особую жидкость, уменьшающую поверхностное натяжение воды. Как должно насекомое выпускать жидкость, чтобы двигаться вперед?

2. Два одинаковых мыльных пузыря соединены трубкой. Будет ли их равновесие устойчивым?

3. Нарисуйте график зависимости давления от высоты в капиллярной трубке, опущенной одним концом а) в воду, б) в ртуть.

4. Почему спички, плавающие на поверхности воды вблизи друг от друга, притягиваются? Как будут взаимодействовать спички, если их предварительно окунуть в парафин? (Вода смачивает дерево, но не смачивает парафин.)

5. В сферической колбе находится жидкость, не смачивающая стенки колбы. Краевой угол равен θ . Как расположится жидкость в невесомости?